جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی‌ام، تابستان ۱۳۹۸

صص ۱۳۲- ۱۱۵

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78939

تحلیل و پیش‌بینی سناریویی اثرات تغییرات آب‌وهوا در آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

نبی‌الله رمضانی- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

بهلول علیجانی[۱]- استاد، گروه جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

رضا برنا- دانشیار، گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۵/۱۱

چکیده

برای ارزیابی تغییرات آینده آب‌وهوای کلان‌شهر تهران و روابط آن با کیفیت هوای تهران از روش پیش‌بینی سناریویی استفاده شد. در این روش ابتدا با استفاده از مدل SDSM و داده‌های روزانه (دما و بارش) ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در کلان‌شهر تهران که از دوره آماری بیشتری برخوردار بودند به پیش‌بینی سناریویی ایستگاه‌ها تا سال ۲۰۴۷ پرداخته شد. سپس با استفاده از میانگین روزانه داده‌های هواشناسی (مشاهده شده و پیش‌بینی شده) ایستگاه‌های مورد مطالعه و میانگین روزانه داده‌های آلاینده شهر تهران به بررسی همبستگی و روابط رگرسیونی داده‌های میانگین مشاهده شده هواشناسی و آلودگی هوا پرداخته و با توجه به روابط رگرسیونی و دسترسی به داده‌های سناریویی هواشناسی به پیش‌بینی سناریویی و وضعیت آلودگی هوا در سال‌های آینده پرداخته شد. بررسی سناریویی شاخص‌های آلودگی هوای کلان‌شهر تهران در ارتباط با شرایط آب‌وهوا نشان داده که در میان شاخص‌های آلودگی هوا، شاخص‌های O_3،CO_2 و PM_{10} با عناصر دمایی در ارتباط بوده و این شاخص‌ها به‌ویژه دی اکسید کربن در ارتباط با شرایط دمایی روند افزایشی یا ثابتی را تا سی سال آینده (۲۰٤۷) تجربه خواهند کرد.

کلیدواژه‌ها: تغییر آب‌وهوا، آلودگی هوا، پیش‌بینی سناریویی، روش SDSM، تهران.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۳۰٤٥٤۱ Email: bralijani@gmail.com

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نبی الله رمضانی دانشجوی آب و هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات با عنوان «اثرات تغییر آب و هوا بر آلودگی هوای کلانشهر تهران» است.

۱- مقدمه

تغییر آب‌وهوا یک پدیده پیچیده اتمسفری – اقیانوسی و متأثر از فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی و درازمدت است. این پدیده متأثر از عواملی چون فعالیت‌های خورشیدی، آتشفشان‌ها، اتمسفر، اقیانوس‌ها و گازهای گلخانه‌ای (با منشاء طبیعی و انسانی) موجود در اتمسفر می‌باشد که بر یکدیگر اثر متقابل می‌گذارند (منتظری و فهمی، ۱۳۸۲). آلاینده‌های جوی نیز عناصری هستند که غلظت زیاد آنها سبب صدمه به چرخه‌های زیستی زمین می‌شود (کاویانی،۲۰۰۲). شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین و پر جمعیت‌ترین شهر کشور، دچار معضل آلودگی هواست و عوامل متعددی از جمله عناصر آب‌وهوایی، مصرف سوخت‌های فسیلی ناشی از حمل و نقل، صنایع و مصارف انرژی خانگی و رشد افسارگسیخته جمعیت و توسعه شهری در ایجاد و دوام آلودگی‌آن نقش دارند.

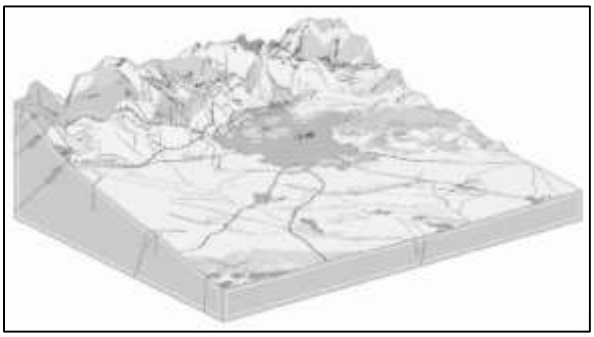
اثر تغییر اقلیم بر آلودگی هوای شهر تهران یکی از مطالعاتی هست که در زمینه آلودگی هوا در شهر تهران انجام شد و بررسی انجام شده نشان داد که اقلیم شهر تهران در دوره آلوده خود از نوسان بیشتری برخوردار بوده و نوسانات اقلیم منطقه در دوره آلوده به‌صورت افزایش دما، افزایش پتانسیل سیلاب خیزی و تغییر اقلیم به‌سوی وضعیتی گرم و مرطوب‌تر بوده است (روشن و همکاران، ۱۳۸۸). بررسی آسیب‌پذیری فضایی و بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران نیز نشان داد که نواحی غرب و جنوب شهر تهران به سبب تراکم بالای جمعیت و همچنین منابع آلاینده آسیب‌پذیری بیشتری را نسبت به سایر بخش‌های شهر از خود نمود می‌دهد که می‌تواند زنگ خطری برای سلامت شهروندان ساکن در این بخش از شهر باشد (عیسی لو و همکاران، ۱۳۹۰). در همین راستا جاوید در سال ۱۳۹۱ با بررسی و تحلیل توزیع مکانی و تغییرات فصلی نشست آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی استان تهران دریافت که شرایط حاد آلودگی معمولاً در شرایطی اتفاق می‌افتد که سرعت باد کمتر است و ذرات به‌راحتی روی سطح نشست پیدا می‌کنند. زبردست و ریاضی (۱۳۹٤) هم در بررسی شاخص‌های محیط انسان ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوای شهر تهران نشان دادند که غلظت آلاینده‌ها در نواحی مرکزی و غیر مرکزی شهر متفاوت بوده و شاخص‌های محیط انسان ساخت با غلظت آلاینده‌های هوا داری همبستگی می‌باشند. در مطالعه‌ای با موضوع پهنه‌بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی نشان داده شد که در بیشتر ماه‌ها، بیشترین آلودگی هوا در مرکز شهر با داشتن ترافیک بیشتر و نیز میزان بارش و سرعت باد کمتر و جهت باد موافق مشهود است (اکبری و همکاران ۱۳۹٤). در بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون نیز با استفاده از متغیرهای آلاینده‌های شاخص کیفیت هوای تهران و عناصر هواشناسی مشخص شد با توجه به معنی‌دار بودن ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌ها، پارامترهای هواشناسی می‌توانند در میزان آلایندگی هوای شهر تهران مؤثر واقع شوند (جوانبخت امیری و خاتمی،۱۳۹۱). بررسی و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر اصفهان نشان داد فصل پاییز آلوده‌ترین فصل در سال است و سال ۱۳۸۸ آلوده‌ترین

سـال بوده و ایستگاه احمدآباد آلوده‌ترین ایستگاه‌ها در بین ایستگاه‌های منتخب بوده است (نوروزی و محمدی،۱۳۹۳). در تبریز نیز با ارزیابی و پهنه‌بندی آلودگی هوای کلان‌شـــهر تبریز دریافتند که روش کریجینگ جهت پهنه‌بندی آلودگی هوا در کلان‌شـهر تبریز از خطای کمتری نسـبت به سـایر روش‌های تحلیل فضـایی داشـته و در تبیین وضعیت کیفیت هوای شـهر در ایسـتگاه‌های مورد نظر نقش کاربری‌های اراضی در کاهش یا افزایش آلودگی را مؤثر دانستند (اسماعیل نژاد و دیگران، ۱۳۹٤). طـــی مطالعه‌ای بررســـی روند نوسانات عناصر آب‌وهوای، افزایش دمای کره زمین را بـــا اســتفاده از تحلیل‌های مربوط به سری‌های زمـانی و مـدل تـابع خطـی رونـد مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این تحقیق با افزایش ۱ درصـــــدی گـــاز CO_2 در قرن گذشـته، دمای کره زمین به‌طور متوســـط به‌اندازه ۱,۳ درجه سانتی‌گراد افــزایش پیـــدا کـــرده اســـت (Allen, 2004). در زمینه روابط آلاینده‌ها و شرایط آب‌وهوایی، فنگر معتقد اسـت علاوه بر منابع آلودگی هوا محلی، فعالیت‌های شـهری به میزان قابل توجهی باعث آلودگی‌های مرزی و افزایش غلظت‌های جهانی گازهای گلخانه‌ای می‌شـود و تلاش برای حل مشـکلات شـهری با معرفی فن‌آوری‌های پاکیزه و با کارآمدتر انرژی تأثیرات مثبتی بر این مشـکلات بزرگ دارد. از سـوی دیگر، تلاش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی شـــهر با گسـترش فعالیت‌ها، ممکن است ترافیک بیشتری را تولید کند و بنابراین اثر متفاوتی داشته باشد (Fenger,2002). دنیل و دیگران (۲۰۰۹) نیز با مطالعه اثرات تغییر آب‌وهوا در کیفیت هوا نشـــان دادند که تغییرات آب‌وهوایی به‌تنهایی باعث افزایش سـطح ازن فصـل تابسـتان در مناطق آلوده در طول دهه‌های آتی خواهد شـد و این افزایش بیشـتر در مناطق شـهری و در دوره آلودگی رخ خواهد داد. در مطالعه ارتباط آلاینده‌های هوا مانند دی اکسـید کربن، ازن، اکسـید نیترون با عناصـر، آب‌وهوایی بارش، رطوبت، دما در شبه‌جزیره کره جنوبی با استفاده از GIS مشخص شد که بین پارامترهای دما و SO_2 و بین سـرعت باد و CO_2 و همچنین بین رطوبت نسبی و O_3 ارتباط معنادار معکوسی وجود دارد (park et al,2012). با بررســی اکســیدهای نیتروژن و ازن و PM2.5 به‌منزله آلاینده‌های هوا و تغییر آب‌وهوای مؤثر بر آن‌ها به‌منزله آلاینده‌ها و تغییر آب‌وهوا مؤثر بر آن‌ها دریافت شـــد که تغییر در دما و الگوی بارش، طول مدت برخورداری از O_3 و شـدت آن را تقویت می‌کند (peel et al,2012). دورتی و دیگران نیز (۲۰۱۳) به بررسی تأثیرات تغییر آب‌وهوا نظیر بارش، رطوبت نسـبی و دما بر آلودگی هوا ازنظر O_3 در جهان پرداختند و دریافتند که در بین ســه مدل بررســی شــــده بین تغییرات دمـا و تغییرات آلودگی ارتبـاط مثبـت وجود دارد. مـدل‌هـای گردش عمومی جوی و روش‌هـای مختلف ریز مقیـاس نمایی از ابزارهای مهم در پیش‌بینی ســـناریویی و بررســـی روند تغییرات آب‌وهوایی می‌باشـــند. بررسـی‌های انجام شـده در کشـور نیز غالباً نشـان از روند مثبت تغییرات دمایی را نشـان می‌دهد. در بررسـی تغییرات زمانی و مکانی بارش سـالانه کشـور، بر اسـاس روش SDSM ، مشـخص گردید به کارگیری داده‌های ریزمقیاس شده حاصـــل از مدل‌های بزرگ‌مقیاس، جهت بهینه‌ســازی داده‌های ادوار آتی، در مقیاس ایســتگاهی می‌تواند به‌صـــورت قابل‌قبول مورد اســتفاده قرار گیرد (اعطاف،۱۳۹۵). نتایج حاصـــل از پژوهش زولکاریان و دیگران (۲۰۱٤) از دو مدل

SDSMو WG - LARS برای شـبیه‌سـازی و ریزمقیاس نمایی بارش و دما در مالزی (با آب‌وهوا حاره‌ای) نشان داد که خروجی‌های SDSM دارای عملکرد بهتری در مقایسـه با LARS-WG می‌باشـند. بررسی عدم قطعیت پارامترهای آب‌وهوای دما و بارش شـبیه‌سـازی شـده توسـط دو مدل ریزمقیاس نمایی WG - LARS و SDSM نشـان داد که مدل WG - LARS در شـبیه‌سـازی بارش دارای عملکرد بهتری نسـبت به مدل SDSM می‌باشـد و در آینده نزدیک کاهش در بارش را نشـان می‌دهد. همچنین مدل SDSM در شـبیه‌سـازی دما دارای عملکرد بهتری بوده و افزایش دما را نشـــان می‌دهد (Zamani et al,2014). در ریزمقیاس نمائی دما در مناطق مختلف پاکســـتان که حســـین کاظم و دیگران (۲۰۱٤) به بررســی آن پرداختند به این نتیجه رسـیدند که خروجی ریز مقیاس نمایی با روش SDSM نسـبت به روش‌های دیگر ریزمقیاس نمایی نتایج بهتری را نشـان می‌دهد. اثر تغییر آب‌وهوا را روی روند رواناب نیز با استفاده از مدل SDSM و HMS-HEC مطالعه قرار گرفت و نشـان داده شـد که مدل SDSM به‌عنوان یک مدل ریزمقیاس نمایی آماری، از کارایی خوبی جهت پیش‌بینی متغیرهای آب‌وهوای برخوردار اســت (Kabiri et al,2015). با توجه مرور مطالعات انجام شـــده در زمینه رخداد تغییر آب‌وهوا در ســـطوح جهانی و ملی و بروز این تغییرات با شـــدت و ضـعف مختلف در کشـور ما، این پژوهش به دنبال مطالعه اثرات تغییر آب‌وهوا بر روند آلاینده‌های کلان‌شـهر تهران در سـال‌های آتی و دسـتیابی به روش‌های مناسب و دقیق جهت تحلیل روابط آلودگی هوا (حاصل از فعالیت‌های انسانی) و تغییرات آب‌وهوایی در کلان‌شـــهر تهران و پیش‌بینی روند آلودگی هوای ناشـــی از این تغییرات در ســـال‌های آینده می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه از لحاظ موقعیـــت مکـــانی در محـدوده کلان‌شهر تهران می‌باشد که بین ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تـــا ۳۵ درجـــه و ٤۸ دقیقه عرض شـــمالی و ۵۱ درجـــه و ۱۷ دقیقـــه تـــا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقـــه طـــول شرقی در کوهپایه‌های جنوبی کوه‌های البرز با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومترمربع واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- بلوک دیاگرام ژئومورفولوژی محدوده تهران (اطلس کلان‌شهر تهران، ۸۹)

برای پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات آینده آب‌وهوای کلان‌شهر تهران و روابط آن با کیفیت هوای تهران از روش پیش‌بینی سناریویی SDSM استفاده می‌شود سپس با روش همبستگی پیرسون و مدل رگرسیونی به پیش‌بینی و تحلیل روابط آینده آن با کیفیت هوای تهران با استفاده از دو سناریو خوش‌بینانه RCP 2.6 و بدبینانه RCP 8.5 پرداخته می‌شود. جهت این کار ابتدا اقدام به ریزمقیاس نمایی خروجی‌های بزرگ‌مقیاس (GCM) شده است. در این پژوهش جهت تولید داده‌های دما و بارش روزانه از خروجی مدل HADCM3 استفاده شده است. یکی از دلایل انتخاب این مدل، در دسترس بودن متغیرهای آن جهت دریافت و نتایج بهتر آن در مطالعات انجام شده دنیا در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. مدل HADCM3 دارای قدرت تفکیک افقی ۲,۵ در ۳,۷۵ درجه عرض و طول جغرافیایی می‌باشد که معادل ۹۶ در ۷۳ نقطه شبکه‌ای در کل کره زمین می‌باشد. تعداد لایه‌های این مدل در راستای قائم جو، ۱۹ لایه است. این مدل طرح‌واره تابشی جدیدی برای مدل‌سازی اثرات گازهای نادر دارد (Edwards&Slingo,1996).

مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM برای شبیه‌سازی داده‌های آب‌وهوای در یک ایستگاه خاص در شرایط حال حاضر و در شرایط آینده تحت تأثیر پدیده تغییر آب‌وهوا بکار می‌رود که داده‌های آن به‌صورت سری‌های زمانی روزانه برای یک سری از متغیرهای آب‌وهوای مانند بارندگی، حداقل و حداکثر دما و سایر پارامترهای جوی می‌باشد (رنجبر، ۱۳۹۵). این مدل اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ویلبی و همکارانش ارائه و توسعه یافت. این مدل از نوع مدل‌های تابع انتقالی (مدل‌های رگرسیونی) می‌باشد و قادر است در هر مرحله اجرا بین ۱ تا ۱۰۰ بار داده‌ها را شبیه‌سازی نماید. در این تحقیق به‌منظور بررسی میزان کارایی مدل از دو معیار میانگین خطای مطلق استفاده شد (رابطه ۱).

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_{iob} - x_{ie}| \qquad (1)$$

که در این رابطه: x_{iob} مقدار مشاهده شده متغیر مورد نظر، x_{ie} مقدار شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر و MAE میانگین خطای مطلق می‌باشد.هر چه مقدار هر MAE کمتر باشد، نشان دهندهٔ این است که مدل متغیر مورد نظر را با دقت بیشتری برآورد نموده است. اگر MAE صفر باشد، بدین معنا است که مدل به‌طور کامل و دقیق متغیر مورد نظر را شبیه می‌نماید. سناریوهای مورد استفاده جهت پیش‌بینی عناصر آب‌وهوا (حداکثر و حداقل(ما و بارش) نیز بر مبنای سناریوی انتشار خوش‌بینانه RCP 2.6 و بدبینانه RCP 8.5 بوده و با استفاده از این سناریوها نیز به پیش‌بینی سناریویی آلاینده‌های هوا پرداخته شد.

۳- نتایج و بحث

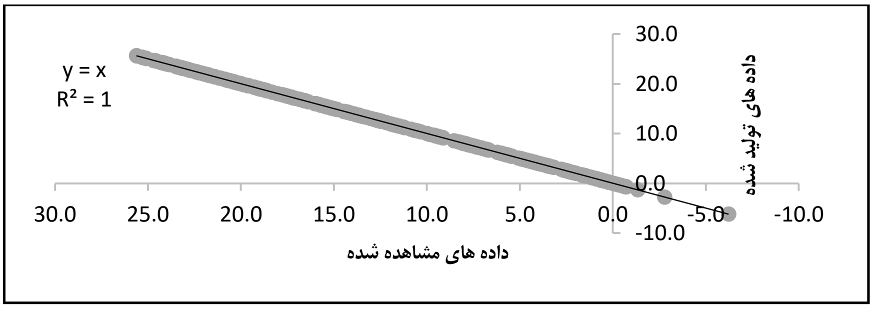
جهت پیش‌بینی و تحلیل سناریویی شاخص‌های آلاینده‌های هوای کلان‌شهر تهران، ابتدا به پیش‌بینی سناریویی شرایط دمای حداقل، حداکثر و بارش روزانه ایستگاه‌های منتخب کلان‌شهر تهران (مهرآباد، ژئوفیزیک و شمیران) پرداخته شده است و سپس با میانگین گیری داده‌های (حداکثر دما، حداقل دما و بارش) ایستگاه‌های منتخب به‌عنوان

داده‌های میانگین شهر تهران و با استفاده از داده‌های میانگین شاخص‌های آلودگی هوای تهران به بررسی و تحلیل روابط همبستگی و رگرسیونی آنها با میانگین شاخص‌های آلودگی هوای تهران پرداخته و رفتار آلاینده‌های هوای تهران در سال‌های آینده از طریق پیش‌بینی سناریویی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۱- پیش‌بینی سناریویی دما و بارش کلان‌شهر تهران

۳-۱-۱- حداقل دمای ایستگاه‌ها

با توجه به روش تحقیق، جهت ریز مقیاس نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس GCM با استفاده از مدل SDSM ابتدا می‌بایست یک رابطه و مدل مناسب بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (NCEP) و داده‌های ایستگاهی دوره حاضر جهت تعمیم به دوره آینده ایجاد نمود. رابطه رگرسیونی بین متغیرهای پیش‌بینی کننده (NCEP) و پیش‌بینی شونده (حداقل دما) برای ایستگاه‌های منتخب شهر تهران نشان داد، دمای حداقل روزانه با متغیرهای ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و تاوایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و تاوایی سطح زمین بیشترین ارتباط را داشته‌اند (جدول ۳). پس از ایجاد معادله رگرسیونی و کالیبره کرده مدل بر روی ایستگاه‌ها در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۰، یک سری زمانی از حداقل دما برای ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۶ جهت صحت سنجی و قابلیت اطمینان مدل تولید شد. نتایج صحت سنجی مدل نشان داد، داده‌های دوره پایه حداقل دما و داده‌های تولید شده در دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۱ از لحاظ میانگین و انحراف معیار دارای یک شباهت نسبی بوده و اختلاف کمی دارند (جدول ۱). از طرف دیگر میزان ارتباط بین داده‌های دوره پایه و داده‌های تولید شده با سطح معنی‌داری بسیار مطلوب و با ضریب همبستگی قوی بیانگر قابلیت و توان مدل برای تولید داده‌های حداقل دمای روزانه برای دوره آینده بوده است (شکل ۱).



شکل ۱- ارتباط بین داده‌های حداقل دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۶

با توجه به آنالیزهای آماری و نتایج ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HADCM3 میانگین دمای حداقل در تمامی ایستگاه‌های منتخب در دوره زمانی ۲۰۱۷- ۲۰۴۷ با افزایش مواجه بوده است. در دوره پیش‌بینی نیز، میانگین حداقل دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه حدود 12.5 درجه سانتیگراد بوده و نتایج نشان می‌دهد بر اساس دو سناریوی RCP

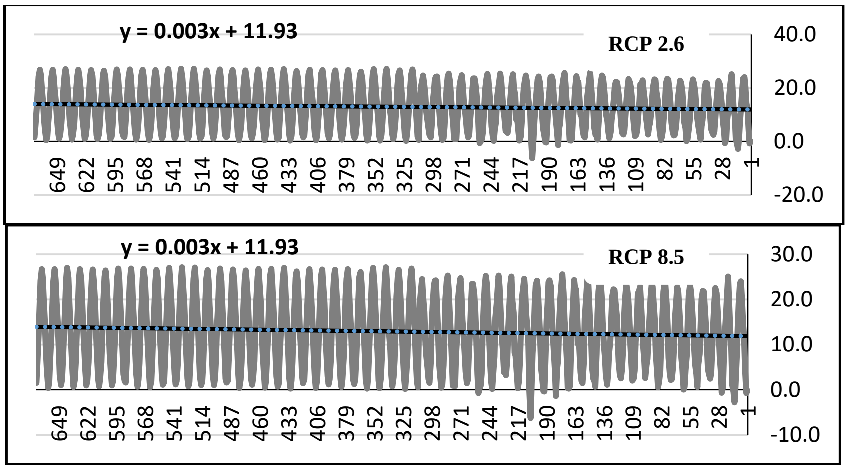
2.6 و RCP8.5 میانگین دمای تهران در دوره ۲۰۱۷– ۲۰٤۷ به ترتیب به ۱۳,٤و ۱۳,۸ درجه خواهد رسید. بااین‌وجود سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 شرایط بدبینانه‌تری را برای هر یک از ایستگاه‌ها به دنبال داشته است. جدول (۲) میانگین دمای حداقل و انحراف معیار آن را برای دوره ۲۰۱۷–۲۰٤۷ نشان می‌دهد و مقدار تغییرات حداقل دما در ایستگاه‌های منتخب در سی سال آینده نشان داد در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP8.5 افزایش دما نسبت به داده‌های مشاهده شده رخ داده است (شکل ۲).

جدول۱ – مقایسه آماری حداقل دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱–۲۰۱٦

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی‌داری
مهرآباد	حداقل دما– مشاهداتی	۱۳,٤	۸,۷		۰
	حداقل دما– مدل شده	۱۳,۷	۸,٦	۰,۹۹	
شمیران	حداقل دما– مشاهداتی	۱۱,۱	۸,۳		۰
	حداقل دما– مدل شده	۱۱,٤	۸,٥	۰,۹۹	
ژئوفیزیک	حداقل دما– مشاهداتی	۱۲,٥	۸,۸		۰
	حداقل دما– مدل شده	۱۲,۹	۸,۷	۰,۹۹	
میانگین کل ایستگاه‌ها	حداقل دما– مشاهداتی ۱۹۹۱–۲۰۱٦	۱۲,۳	۸,٦		۰
	حداقل دما– مدل شده۱۹۹۱–۲۰۱٦	۱۲,٥	۸,۷	۰,۹۹	

جدول ۲ -تغییرات حداقل دمای ماهانه داده‌های مشاهده شده و خروجی مدل

نام ایستگاه	پارامتر	دوره ۱۹۹۱–۲۰۱٦	دوره ۲۰۱۷–۲۰٤۷	
			RCP2.6	RCP8.5
مهرآباد	میانگین حداقل دما	۱۳,٥	۱۳,٦	۱۳,۹
	انحراف معیار	۸,٦	۹,۱	۸,۹
شمیران	میانگین حداقل دما	۱۱,۱	۱۳,۱	۱۳,۲
	انحراف معیار	۸,٤	۸,۹	۸,۹
ژئوفیزیک	میانگین حداقل دما	۱۲,۹	۱۳,٥	۱٤,٤
	انحراف معیار	۸,۷	۸,۸	۹
میانگین کل ایستگاه‌ها	میانگین حداقل دما	۱۲,٥	۱۳,٤	۱۳,۸
	انحراف معیار	۸,٦	۸,۹	۸,۹



شکل۲-تغییرات میانگین ماهانه حداقل دمای تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 (۱۹۹۱-۲۰٤۷)

۲-۱-۳-حداکثر دما

ارزیابی ارتباط بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (NCEP) و متغیر بیشینه دمای روزانه در ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد که از بین تمامی متغیرهای موجود، تاوایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بیشترین ارتباط را با بیشینه دما دارند. درواقع نتیجه مدل و ارتباط بین متغیرها بیانگر این مطلب است که افزایش ارتفاع در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و افزایش میزان تاوایی در این سطح همراه با افزایش دما در تهران می‌باشد. (جدول ۳). با توجه به اینکه برای صحت سنجی مدل ایجاد شده نیاز به تولید سری زمانی دما در دوره مشاهداتی می‌باشد، برای این کار همانند کمینه دما، دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۰ به‌عنوان دوره کالیبراسیون و دوره ۲۰۱۱-۲۰۱٦ به‌عنوان دوره واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج داده‌های تولید شده نشان داد مدل ایجاد شده به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی برای تولید سری به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی تولید سری به‌طور نسبی دارای قابلیت مناسبی برای تولید سری داده‌های روزانه برای آینده داشته است (شکل ۳).

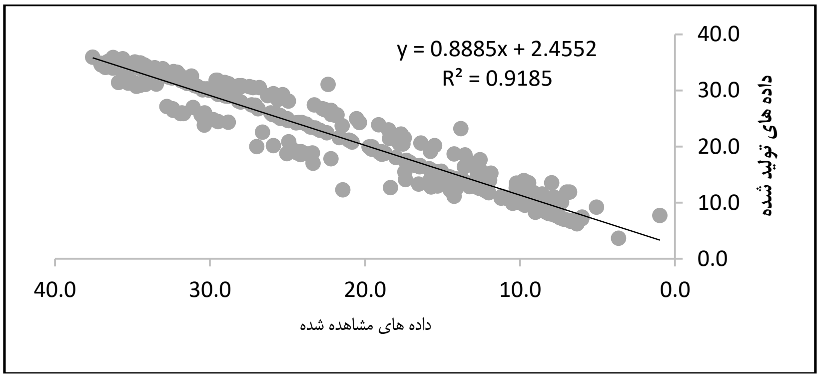
جدول ۳- ارتباط متغیرهای دما و بارش روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه با متغیرهای بزرگ‌مقیاس NCEP.

ردیف	نام متغیر	ایستگاه	ارتفاع سطح hp۵۰۰	تاوایی سطح hp ۵۰۰	تاوایی سطح زمین	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۱	حداقل دمای روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰،۸	۰،۳۸	۰،٥٦	...	...
۲		ژئوفیزیک	۰،٤۸	۰،۳٤	۰،۷٤	...	...
۳		شمیران	۰،۸۱	۰،٤۱	۰،٤۷	...	...
٤	حداکثر دمای روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰،۸٥	...	۰،۳٦	...	...
٥		ژئوفیزیک	۰،٦٤	...	۰،۳	...	...
٦		شمیران	۰،۷۱	...	۰،۲۹	...	...

ادامه جدول ۳

ردیف	نام متغیر	ایستگاه	ارتفاع سطح hp۵۰۰	تاوایی سطح hp ۵۰۰	تاوایی سطح زمین	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۷	بارش روزانه	فرودگاه مهرآباد	۰,٦٤	...	...	۰,٤٨	**۰,۳٦**
۸		ژئوفیزیک	۰,۵۸	...	...	۰,۳۸	**۰,۳٤**
۹		شمیران	۰,٦١	...	...	۰,٤٤	**۰,۳۳**

جدول٤ میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل شده در دوره ۲۰۱۱ –۲۰۱٦ را نشان می‌دهد. طبق این جدول میزان میانگین دما و انحراف معیار در داده‌های مشاهداتی و داده‌های تولید شده دارای اختلاف قابل ملاحظه نبوده و سطح معنی‌داری همه داده‌های مشاهده شده نیز با داده‌های مدل شده در سطح ۰,۰۵ بسیار مطلوب بوده است. نتایج ریز مقیاس نمایی حداکثر دما برای ایستگاه‌های منتخب نیز نشان می‌دهد که دمای هوا در دوره ۲۰۱٦– ۲۰٤۷ و بر اساس دو سناریوی مورد بررسی، دارای روند افزایشی خواهد بود. ریز مقیاس نمایی حداکثر دما برای ایستگاه‌های مختلف نیز روشن ساخته که دمای هوا در دوره ۲۰۱٦– ۲۰٤۷ و بر اساس دو سناریوی مورد بررسی، دارای روند افزایشی خواهد بود (شکل ٤).



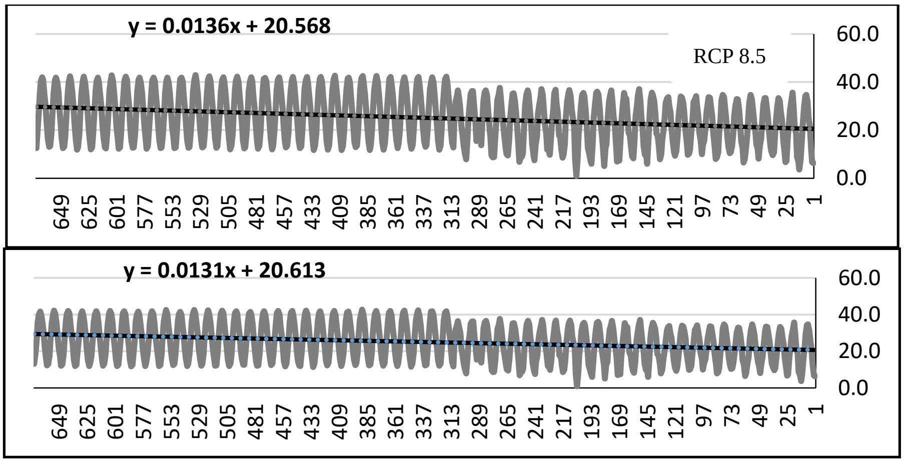
شکل۳ -ارتباط حداکثر دمای ماهانه مشاهداتی و تولید شده دوره ۱۹۹۱–۲۰۱٦

جدول٤ – مقایسه آماری حداکثر دمای ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱–۲۰۱٦

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی‌داری (۰,۰۵)
مهرآباد	حداکثر دما– مشاهداتی	۲۳,٦	۱۰,۱		۰
	حداکثر دما– مدل شده	۲۳	۱۰,۵	۰,۹۲	

ادامه جدول ٤

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی‌داری (۰،۰۵)
شمیران	حداکثر دما- مشاهداتی	**۲۲،۲**	**۱۰،۲**		۰
	حداکثر دما- مدل شده	**۲۲،٦**	**۱۰،۲**	**۰،۹۲**	
ژئوفیزیک	حداکثر دما- مشاهداتی	**۲۳،٤**	**۱۰،۵**		۰
	حداکثر دما- مدل شده	**۲۲،۸**	**۱۰،٤**	**۰،۹۳**	
میانگین کل ایستگاه‌ها	حداکثر دما- مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱٦	**۲۳**	**۹،٦**		۰
	حداکثر دما- مدل شده۱۹۹۱-۲۰۱٦	۲۱	۸،۹	۰،۹۲	



شکل ٤ - تغییرات میانگین ماهانه حداکثر دمای شهر تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 از سال ۱۹۹۱-۲۰٤۷

۳-۱-۳- بارش ایستگاه‌ها

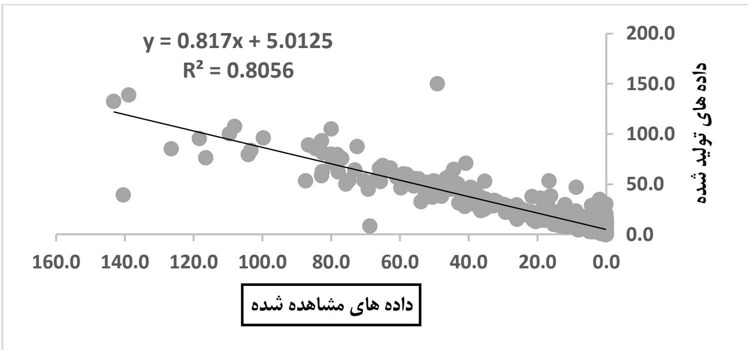
با توجه به رابطه بین داده‌های بارش روزانه در دوره مشاهداتی و داده‌های روزانه (NCEP)، بیشترین ارتباط متغیرهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده)با بارش روزانه (پیش‌بینی شونده) مربوط به تاوایی سطح ۵۰۰، رطوبت سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی سطح ۸۵۰ می‌باشد (جدول ۵). با این ویژگی‌ها، مدل مورد نظر برای ایجاد داده‌های بارش روزانه در دهه‌های آینده و همچنین دوره صحت سنجی تحت تأثیر متغیرهای فوق خواهد بود. در مجموع میزان ارتباط متغیرهای بزرگ‌مقیاس با داده‌های روزانه بارش در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱٦ به‌طور قابل ملاحظه کمتر از میزان ارتباط آنها با داده‌های روزانه دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است. این امر می‌تواند میزان دقت در تولید داده‌های بارش روزانه آینده را تحت تأثیر قرار دهد. برای صحت‌سنجی مدل ایجاد شده، داده‌های بارش دوره ۲۰۱۱-

۲۰۱۶ به‌عنوان دوره صحت سنجی انتخاب و با توجه به مدل رگرسیونی داده‌های مشاهد شده با متغیرهای بزرگ‌مقیاس جدول فوق، داده‌های روزانه بارش تولید شد (شکل ۵). بر اساس این شکل، ارتباط داده‌های مشاهده شده و تولید شده مطلوب بوده و میزان ضریب کنترل این داده‌ها

جدول۵ – مقدار همبستگی جزئی بین بارش روزانه و متغیرهای بزرگ‌مقیاس (NCEP)

ردیف	ایستگاه	ارتفاع سطح hp۵۰۰	رطوبت نسبی سطح ۸۵۰	رطوبت ویژه سطح زمین
۱	فرودگاه مهرآباد	۰,٦٤	۰,٤٨	۰۳٦
۲	ژئوفیزیک	۰,٥٨	۰,۳۸	۰,۳٤
۳	شمیران	۰,٦١	۰,٤٤	۰,۳۳

حدود R=۰,۸۰ بوده است. همچنین میانگین روزانه و انحراف معیار داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و تولید شده را نشان می‌دهد. بر اساس جدول٦ نیز میانگین بارش ماهانه برای دوره مشاهداتی حدود ۲٦,۷ میلی‌متر و برای داده‌های تولید شده حدود ۲٦,٤ میلی‌متر می‌باشد. این مقادیر به همراه مقادیر انحراف معیار بارش مشاهداتی و تولید شده نشان می‌دهد، مدل مورد نظر به‌طور مطلوب کارایی و توانایی بازسازی داده‌های روزانه بارش را برای دوره آینده دارا می‌باشد.



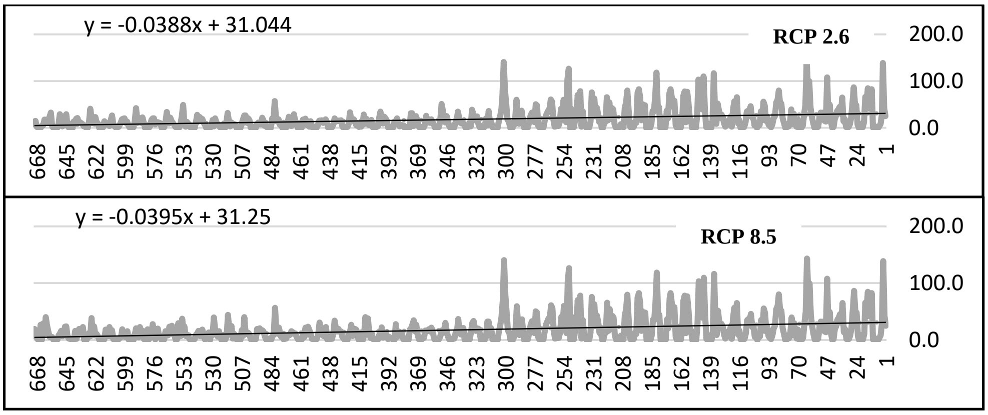
شکل ۵ – ارتباط بین داده‌های بارش ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱-۲۰۱٦

نتایج ریزمقیاس نمایی بارش روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برای دوره ۲۰۱۷-۲۰٤۷ نشانگر تغییرات در مقادیر بارش بوده و بر اساس خروجی سناریوهای مورد نظر، همه ایستگاه‌ها مورد مطالعه با کاهش بارش در سال‌های آینده رو به‌رو خواهد بود (شکل٦) .

جدول٦ – مقایسه آماری بارش ماهانه دوره پایه و تولید شده در دوره ۱۹۹۱–۲۰۱٦

نام ایستگاه	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی (R)	سطح معنی‌داری
مهرآباد	بارش– مشاهداتی	۱۷,۱	۱۹,٦	۰.۸۲	۰,۰۳
	بارش– مدل شده	۱٦,٦	۱۹,٤		
شمیران	بارش– مشاهداتی	۳۳,۵	۳۳,٤	۰,۷۸	۰,۰۵
	بارش– مدل شده	۳۲,۹	۳۳,٤		
ژئوفیزیک	بارش– مشاهداتی	۲۹,٦	٤۹,۹	۰,۷۹	۰,۰٤
	بارش– مدل شده	۲۹,۹	۵۰.۹		
میانگین کل ایستگاه‌ها	بارش–مشاهداتی ۱۹۹۱–۲۰۱٦	۲۷,۷	۲۹,۷	۰.۸۰	۰,۰٤
	بارش– مدل شده۱۹۹۱–۲۰۱٦	۲٦,٤	۲٦,۸		

اســـاس خروجی مدل SDSM حاصــــل از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HADCM3، میانگین بارش ماهانه ایســتگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۰۱۷–۲۰٤۷ تحت ســناریوی RCP8.5 (شــرایط بدبینانه) حدود ۲۰,۹ میلی‌متر، تحت ســناریوی RCP 2.6 (شــرایط خوش بینانه) حدود ۲۲,۱ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که میانگین بارش ماهانه در دوره مشــاهداتی ۱۹۹۱–۲۰۱٦ حدود ۲۵,۵ میلی‌متر بوده که با توجه شکل‌های زیر روند نزولی را طی سالیان آینده نشان می‌دهد.



شکل٦ -تغییرات میانگین ماهانه بارش شهر تهران با سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 از سال ۱۹۹۱–۲۰٤۷

برای ارزیابی و تحلیل ســناریویی آلاینده‌های هوای شــهر تهران، با توجه به نتایج این بررســی‌ها و میانگین داده‌های ســناریویی این عناصــر و اســتفاده از میزان روابط و همبســتگی و معادلات رگرســیونی به تولید داده‌های ســناریویی متغیرهای وابســته یعنی شــاخص‌های متوسـط آلودگی هوای تهران به تحلیل و ارزیابی ســناریویی این متغیرها پرداخته

شـد. برای بررسـی این موضـوع، با توجه به پایه آماری شـاخص‌های آلودگی که از سـال ۲۰۰۶ و داده‌ها روزانه بوده، پارامترهای هواشناسی نیز بر همین مبنا انتخاب و روابط آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲-۳- پیش‌بینی سناریویی آلودگی هوای کلان‌شهر تهران

روابط بین پـارامترهای ثبت شـده و موجود هواشـناسـی و آلودگی هوا نشـان می‌دهد (جدول۷) که بیشـتر شـاخص‌های آلودگی هوا با متغیرهای حداقل و حداکثر دما ارتباط معناداری داشـته‌اند. به‌طوری که روابط شـاخص CO_2 با متغیرهای متوسـط حداقل و حداکثر دمای هوا نشـان از همبسـتگی مطلوب بوده که سـطح معنی‌داری آن به ترتیب ۰,۰۰۳ و ۰,۰۰۹ بوده اسـت. در خصـوص شـاخص آلودگی O_3 نیز روابط این پارامتر با متغیرهای هواشـناسی نشـان از ارتبـاط آن با متوسـط حداقل و حداکثر دما هوا (با سـطح معنا داری ۰,۰۲ و ۰,۰۲۵)بوده اسـت. در بین شـاخص‌های مختلف آلودگی، شـاخص‌های NO_2 و PM2.5 هیچ گونه رابطه و همبسـتگی با متغیرهای هواشـناسـی نداشـتند. در مورد شـاخص آلودگی هوا PM10 نیز این شـاخص با حداقل و حداکثر دما هوای ارتباط مناسـبی نشان داده است که سطح معنی‌داری آن نیز زیر ۰,۰۵ بوده است.

جدول ۷ - روابط متغیرهای آلودگی و هواشناسی تهران در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۶

شاخص‌ها		متوسط حداقل دما	متوسط حداکثر دما	متوسط مجموع بارندگی
CO2	Pearson Correlation	۰,۲۵۹	۰,۲۲۷	۰,۱۶۷-
	Sig. (2-tailed)	۰,۰۰۳	۰,۰۰۹	۰,۰۵۹
	N	٤۰۱۸	٤۰۱۸	٤۰۱۸
O3	Pearson Correlation	۰,۱۹۸	۰,۱۹٦	۰,۱۳۸-
	Sig. (2-tailed)	۰,۰۲۳	۰,۰۲۵	۰,۱۱٦
	N	٤۰۱۸	٤۰۱۸	٤۰۱۸
NO2	Pearson Correlation	۰,۰٦٤	۰,۰۹۱	۰,۰۹٤-
	Sig. (2-tailed)	۰,٤٦٥	۰,۲۹۸	۰,۲۸٤
	N	٤۰۱۸	٤۰۱۸	٤۰۱۸
SO2	Pearson Correlation	۰,۰۹٥	۰,۰٦۸-	۰,۰٦۹-
	Sig. (2-tailed)	۰,۹۷۸	۰,۷٤۷	۰,٤۳٤
	N	٤۰۱۸	٤۰۱۸	٤۰۱۸
PM10	Pearson Correlation	۰,۲٤۷	۰,۲۳۸	۰,۱۹۷-
	Sig. (2-tailed)	.004	.006	.064
	N	٤۰۱۸	٤۰۱۸	٤۰۱۸

باتوجه به کیفیت روابط و همبستگی شاخص‌های آلودگی هوای تهران با متغیرهای هواشناسی منتخب، مشخص شد که تنها شاخص‌های آلودگی CO_2، O_3 و PM_{10} با متغیرهای هواشناسی ارتباط داشته‌اند. بنابراین با کمک داده‌های سناریویی و تولید شده متغیرهای هواشناسی تهران در دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ تحت سناریوهای خوش بینانه RCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6 ، ابتدا به تحلیل رگرسیون داده‌های موجود شاخص‌های آلودگی هوا و پارامترهای هواشناسی پرداخته و با توجه به معادلات رگرسیونی بدست آمده به تولید داده‌های آلودگی هوا و تحلیل سناریویی هریک از آنها پرداخته شد.

شاخص CO_2: با توجه به همبستگی این شاخص با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب بدست آمده در جدول ضرایب رگرسیونی این شاخص (جدول۸) معادله رگرسیونی زیر برای تولید داده‌های CO_2 برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۷ استفاده شد:

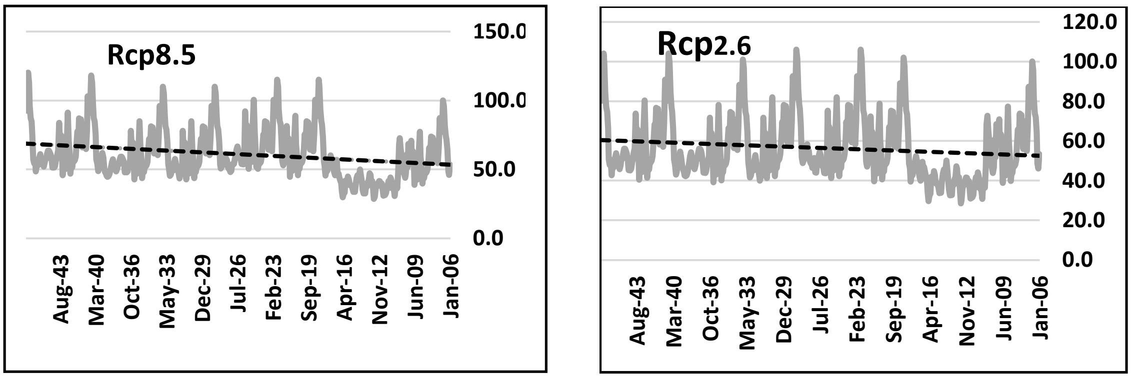
$$Y = 52.9 + 1.74_{mindama} - 1.13_{maxdama}$$ (رابطه۱)

جدول ۸ -ضرایب رگرسیونی شاخص‌های آلودگی

شاخص		ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	t	سطح معنی‌داری
		B	Std. Error	Beta		
CO2	(Constant)	۵۲٫۹۰۹	۶٫۰۲۶		8.779	۰
	حداقل دما	۱٫۷۴۴	۰٫۷۷۳	۱٫۰۱۱	۲٫۲۵۶	۰٫۰۰۲
	حداکثر دما	-۱٫۱۳۴	۰٫۶۶۴	-۰٫۷۶۶	-۱٫۷۰۹	۰٫۰۰۹
O3	(Constant)	۳۵٫۱۶	۶٫۷۶		۵٫۱۹۸	۰
	حداقل دما	۰٫۳۰۴	۰٫۸۶	۰٫۱۶۱	۰٫۳۵۱	۰٫۲۳
	حداکثر دما	۰٫۰۶	۰٫۷۴۵	۰٫۰۳۷	۰٫۰۸۱	۰٫۰۲۵
PM10	(Constant)	۵۹٫۹۲	۴٫۵۵۶		۱۳٫۱۵۱	۰
	حداقل دما	۰٫۵۱	۰٫۵۸۴	۰٫۳۹۷	۰٫۸۷۲	۰٫۰۰۴
	حداکثر دما	-۰٫۱۶۸	۰٫۵۰۲	-۰٫۱۵۲	-۰٫۳۳۴	۰٫۰۰۶

با توجه به معادله رگرسیونی بدست آمده و تولیده داده‌ها به‌صورت ماهانه تا سال ۲۰۴۷، شکل روند این شاخص در حالت‌های خوش بینانه RCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6 ترسیم شد (شکل ۷) که نشان داد در سناریوی RCP 2.6، روند این شاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سیر بطئی افزایشی بوده و از

معنا داری خاصی هم برخوردار نیست. در حالی که در سناریوی بدبینانه یعنی RCP 2.6 این روند نمود بیشتری داشته به‌طوری که نشان دهنده سیر صعودی مقدار CO_2 در سی سال آینده می‌باشد.



شکل ۷ –روند ماهانه شاخص CO2 در سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره ۲۰۰۷–۲۰٤۷

شـاخص O3: با توجه به همبستگی این شاخص با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب بدست آمده در جدول ضـرایب رگرسـیونی این شـاخص (جدول ۸) برای تولید داده‌ها برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰٤۷ به‌صورت زیر می‌باشد:

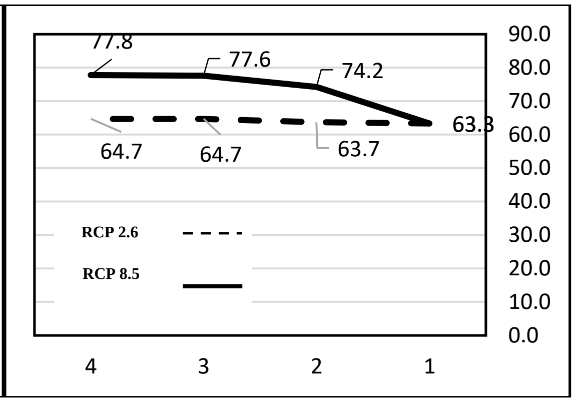
$$Y = 35.16 + 0.304_{mindama} + 0.06_{maxdama}$$ (رابطه۲)

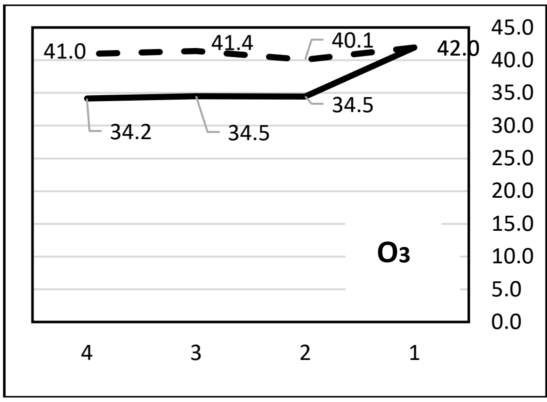
با توجه به این معادله رگرسـیونی و تولیده داده‌ها به‌صـورت ماهانه تا سـال ۲۰٤۷ به بررسـی سـناریوهای خوش بینانهRCP 8.5 و بدبینانه RCP 2.6 پرداخته شـد. همانطور که در شـکل دهه‌ای این پارامتر (شـکل ۸) مشـاهده می‌شـود، در سناریوی RCP 8.5 روند این شاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سیر آرام کاهشی بوده و از نمود واضـحی هم برخوردار نیسـت. در حالی که در سناریوی بدبینانه یعنی RCP 2.6 این روند بدون تغییر را در سال‌های آتی نشان داده است.

شـاخص PM10: با توجه به ارتباط و همبستگی شاخص PM10 با متوسط حداقل و حداکثر دمای هوا و ضرایب رگرسـیونی محاسـبه شـده در جدول (٤–۳۳)، معادله رگرسیونی زیر برای تولید داده‌ها برای دوره زمان ۲۰۱۷ تا ۲۰٤۷ بدست آمد:

$$Y = 59.92 + 0.51_{mindama} - 0.168_{maxdama}$$ (رابطه ۳)

با معادله رگرسـیونی بدسـت آمده و تولیده داده‌ها به‌صـورت ماهانه تا سـال ۲۰٤۷، مشـخص شد که در سناریوی بدبینانه RCP 8.5 روند این شـاخص در ارتباط با حداقل و حداکثر دما دارای سـیر کاهشی در دهه اول و سپس روند ثابت در دهه‌های بعد را نشـان داده اسـت ولی در سـناریوی خوشـبینانه یعنی RCP 2.6 نیز شکل خطی و روند کلی شاخص تقریباً بدون تغییر و سیر بدون نوسان خاصی را برای سالیان بعد نشان داده است (شکل ۸).





شکل ۸ - روند دهه‌ای شاخص PM 10 و O3 در سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره ۲۰۰۷-۲۰۴۷

٤- جمع‌بندی

تحلیل سناریویی داده‌های هواشناسی کلان‌شهر تهران با ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل HADCM3 و روش آماری SDSM روی داده‌های روزانه حداقل دما، حداکثر دما و مجموع روزانه بارندگی در ایستگاه‌های منتخب یعنی فرودگاه مهرآباد، شمیران و ژئوفیزیک تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه RCP 2.6 و RCP 8.5 انجام شد. در ادامه با کمک پیش‌بینی‌های سناریویی انجام شده از متغیرهای هواشناسی به تحلیل سناریویی آلاینده‌های هوای تهران به روش‌های همبستگی و رگرسیونی پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد اولاً روند دمای هوای (حداقل دما و حداکثر دما) در سالیان آینده روند افزایشی (بطئی و نسبی) داشته و نشان از گرم‌تر شدن کلی هوای تهران در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 می‌دهد و در مورد بارندگی نیز با توجه به سیر نزولی مقدار بارندگی در سناریوهای فوق، تهران افزایش خشکی هوا و کاهش نزولات جوی در سال‌های آینده را تجربه خواهد کرد. ثانیاً از بین همه شاخص‌های آلودگی هوا، شاخص‌های CO_2، O_3 و PM10، با عناصر آب‌وهوایی ارتباط معناداری داشته و نتایج بررسی این موضوع نیز نشان داده که تنها شاخص CO_2 در هر دو سناریو به‌ویژه سناریوی RCP 8.5 در سال‌های آتی روند افزایشی خواهد داشت و در شاخص‌های O_3 و PM10 نیز مقدار آنها در سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییرات محسوس افزایشی یا کاهشی نشان نداده است.

درنهایت بررسی روند آلودگی هوای تهران و تناسب آن با عناصر آب‌وهوایی با استفاده از مدل SDSM و تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه RCP2.6و RCP8.5، نشان داد که روند دمای هوای (حداقل دما و حداکثر ماه) در سالیان آینده روند افزایشی (بطئی یا نسبی) داشته و این امر نشان از گرم‌تر شدن کلی هوای تهران در هر دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در سال‌های آتی می هد. در مورد بارندگی نیز با توجه به سیر نزولی مقدار بارندگی در سناریوهای فوق، میزان افزایش خشکی هوا و کاهش نزولات جوی در سال‌های آینده محتمل خواهد بود. تحلیل سناریویی آلاینده‌های هوای تهران نیز نشان داده که تنها برخی از آلاینده‌های هوا (یعنی شاخص‌های CO_2، O_3 و

PM_{10}) با متغیرهای هواشناسی (حداقل و حداکثر دمای روزانه) ارتباط معناداری داشته که بررسی رگرسیونی و پیش‌بینی سناریویی این شاخص‌ها نشان داده که شاخص CO_2 در هر دو سناریو به‌ویژه سناریوی RCP 2.6 در سال‌های آتی روند افزایشی خواهد داشت ولی در شاخص‌های O_3 و PM_{10}، مقدار آنها در سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییرات محسوس افزایشی یا کاهشی را در سال‌های بعد نشان نداده است.

بنابراین با توجه به رخداد علائم تغییر شرایط آب‌وهوایی به‌ویژه تغییرات مثبت دمایی در کلانشهر تهران و ارتباط مثبت تغییر شرایط آب‌وهوایی به‌ویژه پارامترهای دمایی با شاخص‌های آلودگی هوا درنتیجه پیش‌بینی‌های سناریویی باید گفت، آلاینده‌های هوای تهران، در سالیان آینده تغییر افزایشی یا ثابتی خواهند داشت و باید موضوع تغییر آب‌وهوا و آلودگی هوای تهران و تبعات زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی آن را به‌عنوان یک موضوع مهم و حیاتی برای زندگی شهروندان تهران در برنامه‌ریزی‌های کلانشهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران در نظر گرفت.

کتابنامه

اسماعیل نژاد، مرتضی؛ اسکندری ثانی، محمد؛ بارزمان، سپیده؛ ۱۳۹٤. ارزیابی و پهنه‌بندی آلودگی هوای کلانشهر تبریز. *فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای*. دوره. شماره ۱۹. ص ۱۷۳.

اعطاف، سمیه سادات؛ ۱۳۹۵. *بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش سالانه کشور بر اساس مدل گردش عمومی جو و SDSM*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مهندسی کشاورزی. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه ملایر. ص ۸

اکبری، الهه؛ فاخری، معصومه؛ پورغلامحسن، عفت؛ اکبری، زهرا؛ ۱۳۹٤. پهنه‌بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: شهر مشهد). *محیط زیست طبیعی (منابع طبیعی ایران)*. شماره. دوره ٦٨. ص۵۳۳.

جاوید، معصومه؛ ۱۳۹۱. *توزیع مکانی و تغییرات فصلی نشست آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی استان تهران*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه تربیت مدرس.

جوان‌بخت امیری، ستاره؛ خاتمی، سید هادی؛ ۱۳۹۱. بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون. *فصلنامه انسان و محیط‌زیست*. شماره ۲۰. ص ۲۰.

رنجبر، فریبرز؛ ۱۳۹۵. *شبیه‌سازی روند شاخص‌های حدی دما و بارش ایران*. پایان‌نامه دوره دکتری آب و هواشناسی. دانشکده جغرافیا. دانشگاه تهران. ص ۱۱.

روشن، غلامرضا؛ خوش اخلاق،فرامرز؛ نگهبانی، سعید؛ میرکتولی، جعفر؛ ۱۳۸۸. تأثیر آلودگی هوا بر نوسانات اقلیمی شهر تهران. *علوم محیطی*. دوره ۷. شماره ۱. ص ۱۷۳.

زبردست، اسفندیار؛ ریاضی، حسین؛ ۱۳۹٤. شاخص‌های محیط انسان ساخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوا (مطالعه موردی: محدوده پیرامونی چهارده ایستگاه سنجش کیفیت هوا در شهر تهران). *هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*. دوره ۲۰. شماره ۱. ص ۵۵.

شهرداری تهران؛ ۱۳۸۹. اطلس کلان‌شهر تهران (http://atlas.tehran.ir/)
عیسی لو، علی اصغر؛ شاهمرادی، بهزاد؛ بهرامی، سیروان؛ سادات آقامیری، معصومه؛ ۱۳۹۰. آسیب‌پذیری فضایی و بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران. تهران: سومین همایش ملی عمران شهری. ص ۱۲۶.
کاویانی، محمدرضا؛ ۱۳۹۱. *میکروکلیماتولوژی*. تهران: انتشارات سمت. ص ۱۲۲.
منتظری، مریم؛ فهمی، هدایت؛ ۱۳۸۲. اثرات تغییر آب‌وهوا بر منابع آب کشور. تهران: *مجموعه مقالات سومین کنفرانس منطقه‌ای تغییر آب‌وهوا*. ص ۲۸.
نوروزی، اصغر؛ محمدی؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر اصفهان با استفاده از نرم افزار GIS و شاخص کیفیت هوا (AQI). اولین همایش ملی محیط‌زیست. دانشگاه پیام نور واحد دهاقان. ص ۶۹.

Allen, M.R., 2004. Observational Constraints on Future Climate, Robust from model dependent statement of uncertainty in climate forecasting, Contribution to the IPCC workshop on communicating uncertainty and risk: 6.
Daniel J. Jacob a, Darrell A. Winner., 2009. Effect of climate change on air quality, Atmospheric Environment, vol 43:51.
Edwards, J.M. and Slingo A., 1996. Studies with a flexible new radiation code 1: Choosing a configuration for a large-scale model. Q.J.R. Met. Soc., 122: 689-719.
Fenger,J.,2002, Urban air quality ‹Developments in Environmental Science,Vol 1:8.
Gemmer,M., ischer,T., 2014. Statistical downscaling and future scenario generation of temperatures for Pakistan Region. Theor Appl Climatol. DOI 10.1007/s00704-014-1176-1.
Kabiri, R., Ramani Bai, V., Chan, A., 2015. Assessment of hydrologic impacts of climate change on the runoff trend in Klang Watershed. Environmental Earth Science Journal, Vol 73:27.
Kazemi, D.H., Jianping Li, J., Rasul, G., Jiang Tong, J. Ali, G.,CheemaS.B.,Luliu Liu,L.,
Park, D.H., Han, K.B., and Kang, I.J., 2012. The Visualization by Analyzing the Relationship between the Air Pollutants and Climatic Factors using GIS.Proceedings of International conference on disaster management.http://iiirr.ucalgary.ca/.Kumamoto.Japan.August- 2017 -26.
Peel.J. L., Haeuber, R. Garcia, V. Russel, A. G. Neas, L., 2012. Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health.Biogeochemistry.Open access at pringerlink.com.DOI 10.1007/s10533-012-9782-4.
Zamani Nuri,A.Farzaneh,M.Espanayi,K., 2014. Assessment of climatic parameters uncertainty under effect of different downscaling techniques. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. Vol 8. No 9:1316.
Zulkarnain,H., Shamsudin,S. Sobri, H., 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature, Theor. Appl. Climatol.Vol 116:243.